

DOI: 10.5846/stxb201709301770

刘月, 赵文武, 贾立志. 土壤保持服务: 概念、评估与展望. 生态学报, 2019, 39(2): - .

Liu Y, Zhao W W, Jia L Z. Soil conservation service: concept, assessment, and outlook. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2): - .

土壤保持服务: 概念、评估与展望

刘 月^{1,2}, 赵文武^{1,2,*}, 贾立志^{1,2}

1 北京师范大学地理科学学部 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

2 北京师范大学地理科学学部 陆地表层系统科学与可持续发展研究院, 北京 100875

摘要: 土壤保持服务作为一项重要的生态系统调节服务, 是防止区域土地退化、降低洪涝灾害风险的重要保障。针对在全球范围内影响最大的土壤水蚀, 基于土壤侵蚀、运移和输出过程, 对土壤保持服务的概念、评估方法进行了梳理总结。土壤保持服务是指生态系统防止土壤流失的侵蚀调控能力及对泥沙的储积保持能力。土壤保持服务的评估往往是基于通用土壤流失方程 RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), 以潜在土壤侵蚀量 (裸地时土壤侵蚀量) 与实际土壤侵蚀量之差, 作为指标衡量。由于生态过程具有尺度依赖性, 对土壤保持服务的有效评估, 需要采用多尺度方法。土壤保持服务与人类需求紧密相关, 在未来土壤保持服务研究中应强调连接土壤保持服务与人类福祉, 对土壤保持服务产生、流动、使用的全过程及土壤保持服务时空动态与人类福祉变化的关系进行探究。

关键词: 生态系统服务; 水蚀过程; 土壤保持服务; 人类福祉

Soil conservation service: concept, assessment, and outlook

LIU Yue^{1,2}, ZHAO Wenwu^{1,2,*}, JIA Lizhi^{1,2}

1 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 Institute of Land Surface System and Sustainable Development, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Soil conservation service is an important regulating service that can prevent regional land degradation and reduce the risk of flooding. Focusing on the most influential soil erosion type, water erosion, this paper first clarifies the scientific concept of soil conservation service based on soil erosion, transport, and export processes. Soil conservation service is defined as the capacity of the ecosystem to prevent soil erosion and retain sediment. Then, an analysis of the assessment methods used to evaluate soil conservation service was undertaken. Based on the revised universal soil loss equation, soil retention (calculated as potential soil erosion (erosion without vegetation cover) minus actual soil erosion) was applied as an indicator of soil conservation. The effectiveness of soil erosion at the individual-plant scale depends on plant morphology. As the scale increases, land use gradually plays an increasing role in curbing soil erosion, and large basins are more closely related to fluvial erosion and storage processes. Considering the scale-dependency of the erosion processes, a multi-scale method is needed to assess soil conservation service. The models used to quantify soil conservation service mainly address soil detachment processes only, and do not simulate soil redistribution, by ignoring processes such as sediment deposition and transport. Additional studies of sediment deposition and transport are needed. Soil conservation service can be considered a link between biophysical reality (the ecological system) and human well-being (the socio-economic system). To fully understand the effects of soil conservation on human well-being, the supply and the demand of soil conservation services both need to be measured.

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2017YFA0604704); 国家自然科学基金 (41771197)

收稿日期: 2017-09-30; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaoww@bnu.edu.cn

Key Words: ecosystem service; water erosion; soil conservation service; human well-being

气候变化和人类活动改变了全球生态系统结构与功能,已经并将持续影响全球生态系统服务供给^[1]。土壤保持服务是生态系统提供的一项重要调节服务,指生态系统防止土壤流失的侵蚀调控能力以及对泥沙的储积保持能力^[2]。最近的相关研究表明在人类活动和气候变化的影响下,全球土壤侵蚀有加剧风险,土壤保持服务面临严峻挑战^[3]。加剧的土壤侵蚀不仅会造成局地水土流失、土壤肥力降低、粮食产量下降进而影响粮食安全,同时由于河流输沙量的增加,会对下游地区的灌溉、污水处理、水库使用产生影响;此外,土壤侵蚀也能够造成土壤有机碳的横向移动,进而对全球碳循环产生影响^[4]。由于土壤侵蚀对全球环境变化的敏感性以及与社会经济环境的相关性,如何制定适应性管理策略以提高生态系统土壤保持服务能力,降低土壤侵蚀危害,成为政策制定者关注的焦点。近年来,学者们开展了系列土壤保持服务研究,但现有研究对土壤保持服务概念理解不一、评价方法各异、涉及尺度单一、缺乏影响机制分析。针对土壤保持服务形成从概念、方法、机理到不同尺度间相互作用的系统性完整研究体系仍然尚未形成,相关研究亟待系统梳理。

生态系统服务产生的基础是生态系统的结构与过程,就土壤保持服务而言,其供给能力大小主要由空间上的侵蚀产沙、运移沉积过程决定。以降雨为主要侵蚀力的水蚀是全球范围最主要的土壤侵蚀形式。本文针对水蚀过程,对土壤保持服务的概念内涵、评估方法和尺度效应进行了总结梳理,并对未来土壤保持服务研究方向进行展望,以期为全球变化背景下土壤保持服务研究和管理提供参考。

1 土壤保持服务的概念内涵

生态系统服务是指人类从生态系统中获得的各种惠益。生态系统服务作为连接生物物理过程和人类福祉的桥梁,其概念内涵包括两方面:既关注服务产生的生态系统服务供给(自然系统),同时重视人类从中获得的惠益,即生态系统服务需求(社会系统)。对土壤保持服务来说,也是如此,由于受到如植被覆盖、土壤、地形等生态系统结构和组分因素的影响,自然生态系统具有控制侵蚀和拦截泥沙的能力,这种能力可以理解为生态系统提供土壤保持服务的潜在能力,即土壤保持服务的潜在供给。当这种土壤保持服务供给被人类消费使用,以满足粮食生产需求和带来清洁水质等一系列惠益时,这种潜在的土壤保持服务供给即变为生态系统为人类提供的实际土壤保持服务(图1)。而由于现有的土壤保持服务文献大多是从自然系统出发,针对土壤保持服务潜在供给能力进行分析,因此,本文主要是从土壤保持服务供给角度出发,以土壤侵蚀、运移、沉积等过程为主线,并结合当前主要生态系统服务分类体系,对土壤保持服务概念进行界定,总体可以分为侵蚀调控和土壤保持两方面(图1)。

(1) 基于侵蚀调控角度的土壤保持服务,英文表述为 erosion control service, erosion protection service 或 erosion regulation service。有些研究直接称其为生态系统的侵蚀调控服务,强调生态系统调节侵蚀,减少泥沙输出的能力^[5]。自然界中的泥沙主要受侵蚀产沙、运移沉积等过程的影响。生态系统的侵蚀调控服务即可以理解为自然生态系统对泥沙的产生、运移、沉积等过程的影响,使得泥沙在时间、空间、数量上发生变化,主要变现表现为侵蚀产沙量和河流输沙量的减少,从而达到对侵蚀的调节控制作用。由于泥沙运移过程的复杂性,目前研究常忽略泥沙在地表的运移沉积过程,更多地关注于自然生态系统对侵蚀产沙和泥沙输出量的作用和影响。这一研究方法类似于黑箱研究,弱化侵蚀过

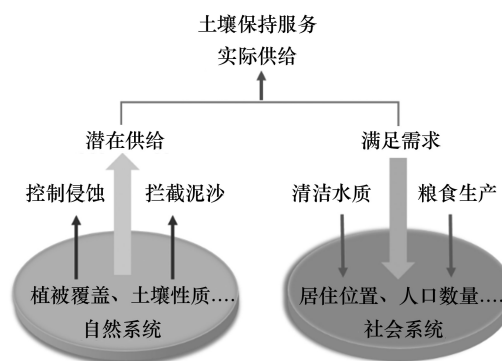


图1 土壤保持服务内涵包括潜在供给和满足需求两方面

Fig.1 The potential supply and beneficiaries together make the definition of soil conservation service

程而聚焦泥沙的产生和输出情况。一方面,从泥沙产生角度,可以通过地块土壤侵蚀量的时空变化和分布来反应生态系统控制侵蚀的能力。另一方面,从泥沙输出角度,则可以以流域出口断面产沙量的变化或者河流某一断面输沙量的变化来衡量生态系统对泥沙的调控能力,同时也可以选择研究区任一位置作为感兴趣点(point of interest),以通过该位置泥沙量的变化作为衡量指标^[6]。有些研究直接将水库作为基准,分析上游生态系统同对其泥沙淤积的影响。在这些研究中,通常直接将土壤保持服务理解为生态系统提供的减轻水库泥沙淤积及改善水质的服务(Avoid Reservoir sediment and Water Purification service)。

(2) 基于保持土壤角度的土壤保持服务,英文表述为 soil retention service, sediment retention service 或 soil conservation service。相关研究侧重于生态系统对土壤的保持和泥沙储积能力,将土壤保持服务理解为在一定时间和空间范围内,生态系统保持土壤的过程和能力,往往采用相应时空尺度下的土壤保持量进行表征。由图 2 可知,泥沙从陆地产生到运移至海洋是一个复杂的动态过程,在这个过程中生态系统保持的土壤总量不仅包括在地块尺度上由于植被覆盖和管理措施减少的土壤侵蚀量,还应包括泥沙运动过程中被植被拦截的量,以及由于平原、湖泊、河道、水库大坝等地形和人类活动引起的泥沙沉积量。

综上,本文将土壤保持服务界定为:生态系统防止土壤流失的侵蚀调控能力、对泥沙的拦截能力以及河流湖泊湿地库坝中的淤泥储积能力。针对土壤水蚀过程,在水平方向上侵蚀产沙、运移沉积和输沙过程进行可以概化为图 2 所示。要准确评估生态系统的土壤保持服务,需要刻画泥沙在水平方向上再分配的过程,并对各个分量做深入定量的分析。在图 2 中,其侵蚀量平衡方程为:土壤侵蚀量=土壤保持量+泥沙输出量。

2 土壤保持服务评估方法

土壤保持服务评估应包括两部分,即针对自然系统的土壤保持服务供给评估,以及针对人类系统的人类受益评估。现有研究往往侧重于土壤保持服务供给的评估研究。

2.1 评估指标

与生态系统服务评估一致,土壤保持服务评估可以分为价值量和物质质量评估两种类型。物质质量评价方法,通过揭示生态系统服务物质质量动态变化水平,能够反映

生态系统过程的特点,从而有益于对生态系统服务可持续性的分析^[7]。目前对土壤保持服务的评估也是主要基于土壤侵蚀视角,根据生态系统对侵蚀产沙过程的影响对其进行物质质量评估。

自然界中侵蚀产沙—运移沉积—泥沙输出过程中的各个分量,即土壤侵蚀量、土壤保持量、输沙量或产沙量均可以作为衡量土壤保持服务能力的指标。其中,土壤在径流作用下产生位移的物质质量,称为土壤侵蚀量(soil erosion);由于地块上植被对降雨的拦截以及植物根系对土壤固定作用减少的土壤侵蚀量、侵蚀产生的泥沙在运移过程被植被拦截的量以及泥沙在河流湖泊、水库中沉积量的总和为土壤保持量(soil retention);泥沙经过侵蚀和运移沉积过程后向流域外输出,即有了产沙量和输沙量概念,在特定时段内,通过小流域出口观测断面的泥沙总量,称为流域产沙量(sediment yield);而当泥沙进入河流中,把一定时段内通过河道某断面的泥沙数量称为该时段的河流输沙量(sediment delivery 或 sediment load)。除以上与土壤侵蚀过程相关的指标外,植被覆盖度、土地利用和地形作为生态系统组分与结构的代表,是形成土壤保持服务的基础要素,也可以作为衡量土壤保持服务能力的替代指标(表 1)。

2.2 测算方法

由于土壤保持服务包括控制侵蚀、减少泥沙输出的内涵,所以可以直接用一个地区土壤侵蚀量和输(产)沙量在时间上的变化来表征土壤保持能力,这时得到的结果并非具体土壤保持服务数值,而是通过一定时间范围内(通常为年际间变化)土壤侵蚀量或输(产)沙量变化幅度来说明该地区土壤保持服务能力强弱的变

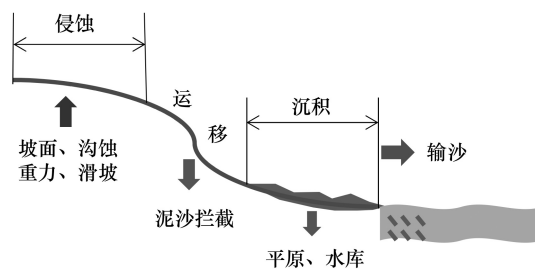


图 2 泥沙在地表的运动过程及沙量平衡

Fig.2 The overland process of soil movement and sediment budget

化。首先,土壤侵蚀量的计算,多采用通用土壤流失方程 RUSLE(The Revised Universal Soil Loss Equation),其核心是计算模型中的降雨侵蚀力(R)、土壤可蚀性(K)、地形(LS)、植被覆盖与管理(C)、人工管理措施(P)等6个因子。由于参数简单,便于计算,在多种生态系统服务综合评价中,可以用其快速模拟土壤保持服务空间分布特征和时间动态变化,便于与其他类型服务比较^[8-9]。在模型应用中,关键问题是参数率定,已有许多研究对此进行了探讨,主要包括结合研究区自然环境状况和观测资料,校正参数计算方法以实现参数本地化;分析不同数据源对计算结果影响,确定最优数据源以及如何数据缺乏或精度有限的情况下,利用现有观测资料对参数进行计算^[10-11]。RUSLE 模型主要局限性在于仅考虑坡面侵蚀,并没有考虑沟蚀、重力侵蚀、河道侵蚀等其他侵蚀来源。

表 1 土壤保持服务评估指标
Table 1 The indicators of soil conservation service assessment

指标分类 Indicator type	指标名称 Indicator name	指标含义 Indicator meaning
土壤侵蚀过程指标 Soil erosion process indicators	侵蚀产沙	侵蚀量
		一定时空范围内,土壤在径流作用下发生位移的物质质量
		土壤侵蚀量变化
		当前植被覆盖和裸地相比减少的侵蚀量
	运移沉积	土壤保持量
		一定时空范围内,生态系统保持拦截的泥沙量
	泥沙输出	输(产)沙量
		流域出口断面产沙量或河流某一断面输沙量
生态系统结构指标 Ecosystem pattern indicators		输(产)沙量变化
		当前植被覆盖和裸地相比减少的输(产)沙量
	植被盖度,土地利用、地形	不同植被盖度和土地利用控制侵蚀或拦截泥沙能力不同

与直接计算土壤侵蚀量相对应,土壤保持量是更为常用的指标。土壤保持量是指由于当前植被覆盖和管理措施减少的土壤侵蚀量,往往基于 RUSLE 模型,以潜在土壤侵蚀量(裸地时土壤侵蚀量)与实际土壤侵蚀量之差来刻画土壤保持量。该方法已被应用于流域、区域、国家、大洲等不同尺度的土壤保持服务评估中,且由于模型参数对气候和土地利用变化敏感,常用其模拟或预测气候和土地利用变化下的土壤保持服务动态^[12-13]及变化特征^[14]。假设研究区所有土地均为裸地,用此时的土壤侵蚀量作为基础值,优点是便于情景分析,可以直观比较不同土地利用和植被覆盖条件下土壤保持能力大小,但这种极端假设本身在现实中难以发生,仅以此来评价某一种土地利用情景下的土壤保持量,存在高估的问题。

对于流域产沙量或河流输沙量这一指标,通常在利用 RUSLE 求得土壤侵蚀量的基础上,根据泥沙输移比计算。泥沙输移比(SDR, Sediment Delivery Ratio)为流域出口断面输沙量与断面之上侵蚀量之比^[15]。SDR 的计算,一般通过与流域面积、降水产流、植被覆盖、地形地貌等影响因子建立关系式求解或直接参考研究地区已有文献赋予经验值。由于概念简单且容易计算,该方法被广泛使用。在最新的 InVEST 3.0 中,土壤保持模块计算就采用了该方法,其中 SDR 在考虑栅格间水文连通性的基础上通过构建与植被覆盖、坡度的关系式求解。Hamel 等利用其对美国北卡罗拉洲 Cape Fear 流域土壤保持服务进行评估,并利用实测数据验证其具有较高的模拟精度^[16]。Sánchezcanales 等在 Ibrian Peninsula 流域对模型进行的敏感性分析显示,R 因子和 K 因子对模型结果影响最大。同时指出,这两个因子都易受气候变化驱动,R 因子是直接受影响,K 因子则是温度和水分变化引起土壤有机质含量变化后间接受到影响^[17]。由于 RUSLE 只考虑了坡面侵蚀,有学者在利用泥沙输移比计算流域产沙量的基础上,结合泥沙平衡的思想,通过野外观测或查阅文献的方法获取河道侵蚀量或水库沉积量值完善模型结果,使结果更加精确也便于验证^[18]。直接在流域或区域尺度上建立的侵蚀产沙模型或河流输沙模型也可以对产沙输沙量进行相对准确的预测。该类模型根据是否刻画土壤侵蚀过程分为物理模型和经验模型;根据预报结果的差异,又可以分为空间集总式和空间分布式模型^[19]。需要注意的是,许多河流输沙量模型如 ART(Area Relief Temperature sediment delivery mode)模型,与流域侵蚀产沙模型相比,多关注于泥沙在河道中的侵蚀运移过程,特点是可以对长时间序列的河流输沙量进行模拟,如百年或千

年,而且往往适用于空间大尺度($>10000\text{ km}^2$),但模型参数通常对气候和土地利用变化不敏感,难以应用于未来气候和土地利用变化情景^[20-21]。

以上方法是从泥沙产生与输出角度来评估土壤保持服务能力,并未考虑泥沙在运移过程中的拦截和沉积。然而,植被不仅能够影响局地土壤侵蚀,而且能够拦截上游地块产生的泥沙。考虑泥沙沿水文路径运移过程中地块对上游泥沙的拦截能够更科学准确地评估土壤保持量。目前这一问题在 InVEST2.5.6 中得到了解决,其土壤保持模块考虑了地块本身拦截上游沉积物的能力^[22]。该模型的局限性主要表现在,同手动计算的 RUSLE 一样,未考虑沟蚀、重力侵蚀、河道侵蚀等泥沙来源,同时流域面积不能太大(不超过 4000×4000 个像元),且对用户率定模型参数的能力要求较高。为此,Naipal^[23]等提出一种简单的沙量平衡方法,可以模拟水平方向上泥沙的侵蚀、运移、沉积等再分配过程,对空间大尺度和长时间序列下的泥沙沉积量进行计算。该方法基本思路是将研究区栅格化并假设每个栅格均包括山区和平原两部分,侵蚀产沙主要在山区发生,然后由山区运往平原,在平原地区发生运移和沉积,最终泥沙沉积量由平原和山区两部分组成,并在栅格尺度上输出。

虽然上述模型在构建时已经对侵蚀运移过程进行了一定程度的简化,但模型的运行依然涉及众多参数,需要大量数据的支持,这不仅限制了评估结果的更新,而且不利于模型在数据相对匮乏地区的应用。以净初级生产力(NPP, Net Primary Productivity)为核心设计出的定量指标模型,将初级生产力视作土壤保持服务分布的替代指标,模型涉及参数明显减少,数据可通过遥感手段及时获取,有助于大尺度动态评估工作的开展^[24]。

除了利用模型定量评估土壤保持服务能力,还可以用土地利用类型或植被覆盖度等指标作定性评价,划分区域土壤保持服务供给的优先等级,确定水土保持重点区域。如, Egoh 等在综合考虑植被覆盖度和土壤侵蚀强度的基础上,采用专家评价的方法划分土壤保持服务供给的重点和热点区域^[25]。Jackson 等则主要考虑地形对土壤侵蚀过程的控制,提出复合地形评价指数 CTI(Compound Topographic Index)来识别易受土壤侵蚀的脆弱区^[26]。此外, Logsdon 等构建了侵蚀调节指数 ERI(Erosion Regulation Index),通过比较实际土壤侵蚀量与容许土壤流失量(Soil Loss Tolerance)的关系来定性评价区域侵蚀调控能力^[27](表 2)。

2.3 多尺度评估及尺度效应

土壤保持服务是一种“定向流动服务”(directional flow related),上游地区的侵蚀变化,不仅会对局地造成影响,而且会沿着水系或者泥沙运移路径对中下游等其他区域造成影响。从局地尺度上关注土壤侵蚀对作物生长的影响到全球尺度研究土壤侵蚀对碳循环影响,不同尺度上,人们对土壤保持服务流的侧重不同。所以,对土壤保持服务的有效评估,需要沿着土壤侵蚀—运移—沉积的路径,从坡面-流域-区域-全球等不同空间尺度上开展,在评估中选取相对应的评估指标和评估方法,以反映不同尺度上主导过程和影响因素(图 3)。

坡面尺度评估主要依赖于对土壤侵蚀控制机理及过程的理解。许多研究从土地利用方式和土地管理措施角度出发,探讨了其对坡面土壤侵蚀的影响,取得许多实质性进展,如 Fu 等使用 ^{137}Cs 核素示踪方法,定量评估了不同土地利用组合对土壤侵蚀的影响。结果表明,从山脚到山顶,草地(6 年生)+成熟林(25 年生)+草地(25 年生)配置可以减少 42% 土壤侵蚀^[28];Chen 等针对中国区域 Meta 分析表明梯田措施可以减 53.0% 的产沙量^[29]。在此基础上,发展出了 RUSLE 和 WEPP 等坡面尺度的经验或过程模型,以及基于植被覆盖,地形条件的简单评价指数对可能发生侵蚀的区域及侵蚀量进行定量或定性评估。坡面尺度是研究土壤侵蚀控制机理,探索土壤保持服务形成过程的理想尺度,在土地利用基础上深入探讨土壤保持服务供给与植被功能性状之间的关系,是进一步理解生态系统土壤保持服务供给机制及提高评估精度的关键。

流域是江河水系的基本集水单元,也是一个独立的产沙、输沙系统^[30]。在流域尺度上,土壤流失的类型不仅包括坡面尺度上的溅蚀、片蚀、细沟侵蚀、浅沟侵蚀,也包括沟道侵蚀、重力侵蚀等^[31]。除了侵蚀类型更

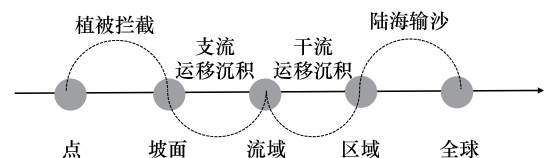


图 3 地表侵蚀产沙—运移沉积—泥沙输出过程的尺度特征

Fig 3 The scale characteristic of the overland process of sediment

表 2 土壤保持服务测算方法对比
Table 2 The comparison of soil conservation service assessment methods

指标名称 Indicator name	测算方法 Equation	优点 Advantages	缺点 Limitations	适用尺度 Applicable scale	文献来源 References
土壤侵蚀量 Soil erosion	RUSLE 模型: $E = R \times K \times L \times S \times C \times P$	参数简单,易进行不同情景的对比分析	仅考虑坡面侵蚀过程	坡面模型,目前流域到全球尺度都有应用	Brambilla, 2017; [8]
土壤侵蚀量变化 Soil erosion change	RUSLE 模型: $E = R \times K \times L \times S \times (1 - C \times P)$	参数简单,可输出多组结果	仅考虑坡面侵蚀过程	坡面模型,目前流域到全球尺度都有应用	Fu, 2011; [11]
土壤保持量 Soil retention	NPP 指标模型: $E_r = NPP \times (1 - VC_{NPP}) \times (1 - S_d) \times 1.5$ InVEST 模型 2.5.6 版本: $E_r = RKLS \times (1 - CP) + UPS_{retain}$	参数简单,易应用于数据匮乏区 运行简便,易操作 考虑坡面拦截	精度有限 流域面积不能太大	流域及更大尺度 中小流域尺度	Maria, 2012; [24] Tallis, 2010; [22]
输(产)沙量 Sediment yield	沙量平衡模型: $E_r = D_a + D_c$ 泥沙输移比: $Q = R \times K \times L \times S \times C \times P \times SDR, ART$ 模型等	考虑泥沙在水平方向运移沉积 数据量小,运行简便	仅适用于较长时间序列 输移比概念及计算有争议	流域及以上尺度 大尺度(>10000km ²)	Naipal, 2016; [23] Vente, 2013; [19]
输(产)沙量变化 Sediment yield change	InVEST 模型 3.0 版本: $Q = R \times K \times L \times S \times (1 - C \times P) \times SDR$	运行简便,结果详尽	结果易产生误差	中小流域尺度	Hamel, 2015; [16]
植被盖度、土地利用 Land cover, land use	定性评价不同类型不同植被覆盖度的土壤保持能力	对数据要求低	不利于推广比较	流域及更大尺度	Egoh, 2008; [25]
其他定性指标 Others	复合地形指数: $CTI = A \times S \times PLANC$ 侵蚀调节指数: $ERI = \exp^{(1-E_{ann}/E_{max})}$	结果比较可靠 可以识别侵蚀危害区	数据不易获取 结果不确定性大	仅适用于坡面尺度 流域及更大尺度	Jackson, 2013; [26] Logsdon, 2013; [27]

E_r : 土壤侵蚀量, E_r : 土壤保持量, Q 输沙量, 单位均为 $t\ km^{-2}\ a^{-1}$; R : 降雨侵蚀力因子 ($MJ\ mm\ h^{-1}\ a^{-1}$); K 是土壤可蚀性因子 ($MJ^{-1}\ mm^{-1}\ t\ h$); LS 为坡度坡长因子; C 为覆盖和管理因子; P 为土壤保持措施因子, L, S, C, P 均为无量纲常量。 UPS_{retain} : 地块拦截上游地块的泥沙量; NPP 为净初级生产力, VC_{NPP} 为 NPP 变异性, S_d 为平均坡度修正; D_a : 山区土壤保持量, D_c : 平原土壤保持量, 单位均为 $t\ km^{-2}\ a^{-1}$; ART : $AreaReliefTemperatureSedimentDeliveryMode$; CTI : compound topographic index 复合地形评价指数; A : 上坡汇水面积 (m^2); S : 局地坡度 (m/m); $PLANC$: 坡面曲率 ($1/100\ m$); ERI (erosion regulation index): 侵蚀调节指数; E_{ann} : 年平均土壤侵蚀量, 单位 $t\ km^{-2}\ a^{-1}$; E_{max} : 容许土壤流失量, 单位 $t\ km^{-2}\ a^{-1}$

加复杂,由于流域不同土地利用格局配置的影响,地块边界对泥沙拦截的作用也变得复杂。目前流域尺度上,主要应用 InVEST 模型对土壤保持服务供给特征进行空间模拟和绘图,同时分析其随土地利用格局变化的改变,尽管许多研究均已表明土地利用变化对流域侵蚀产沙量有较大影响^[32-33],研究者们也试图通过这种变化来描述其对人类福祉的影响,将研究结果应用于管理决策中,但并没有什么进展。一方面是由于缺乏操作简便可以模拟流域尺度上土壤侵蚀和再分配过程的模型,另一方面,则是评估中常常忽略人的需求。生态系统过程和服务常常具有一个特征尺度,即典型的范围范围和持续时段,生态系统服务只有在特征尺度上才能表现其显著的主导作用和效果,并且易于观测,从而被充分地表达出来。对土壤保持服务来说,流域作为一个完整的水文和管理单元,是研究土壤保持服务产生、流动与使用的一个理想尺度,亟待于在准确刻画流域内土壤侵蚀运移过程的基础上,探讨土壤侵蚀变化的局地远程影响,以更好地服务于流域管理。

在更大空间尺度(如大洲、全球尺度)上,土壤侵蚀造成的土壤碳在空间上的横向流动,对碳循环过程具有重要影响^[34]。定量评估全球土壤侵蚀对理解全球碳循环过程有重要意义,尽管已有研究者们利用 RUSLE 模型模拟了全球土壤侵蚀空间分布特征,识别了土壤保持服务关键区域,但评估结果有很大不确定性^[35-36]。随着尺度上升,造成评估困难的根本原因是不同尺度间分辨率不匹配。就土壤保持服务而言,从景观角度上看,斑块位置与景观格局不同,侵蚀过程对环境的响应不同。因此,在大尺度评估中,关键是准确刻画景观的异质性,但大区域的评估一般使用分辨率较小的数据,即使使用较高分辨率详细地进行数据采集,但是,仍会出现由于空间数据融合与使某些局部格局特征或特异现象消失,因此不能辨识只有在高分辨率下才能被观察到的生态过程。而模型通常是在小尺度建立,且是在高分辨率下进行的参数率定,而在大尺度应用时,输入的是低分辨率数据,正是由于这种分辨率的不匹配性造成了大尺度评估结果存在很大不确定性,如何降低这种不确定性成为学者们普遍关心的问题。Sebastian 等利用美国 4 万多条农田实测数据对 RUSLE 模型进行校正,建立了一个可由低精度全球数据库数据驱动的简化土壤侵蚀模型,评估了全球农田的侵蚀速率及其导致的土壤碳流失量^[37]。Naipal 等利用气候分带和分形方法改进了 RUSLE 中 R 因子和 S 因子计算方法,进一步提高了模型在全球尺度上受低分辨率数据驱动时评估精度^[38]。另外,随着尺度增加,河道中侵蚀和沉积过程逐渐发挥着主导作用,河流输沙量作为一个重要指标,可以反映大尺度地区土壤保持能力,到全球尺度上,陆海输沙量作为一个重要指标不仅可以刻画全球土壤侵蚀状况,同时对了解陆地生态系统与海洋生态系统碳通量有着重要意义。在全球变化大背景下,需要在不同尺度上探讨气候变化和人类活动双重驱动力下生态系统过程和土壤保持服务供给的变化,明确局地、区域、全球不同空间尺度上土壤保持服务的影响因素。

3 结论与展望

目前土壤保持服务评估主要依靠以 RUSLE 为基础发展的一系列评价方法,存在两个问题:一方面,基于土壤侵蚀视角进行土壤保持服务评估,难以揭示在水平方向上由泥沙运移导致的土壤再分配过程;另一方面,也会受到数据缺乏等因素限制,难以在大尺度应用。从土壤属性、土地利用、植被覆盖、地形等自然系统组分及泥沙运移沉积等自然过程出发,探索土壤保持服务形成的过程及机制,深入理解其变化过程和驱动机制,是对土壤保持服务进行科学评估的基础。但是,必须注意到,生态系统的结构和过程决定着生态系统的功能表现,其关系客观存在而不以人的意志为转移,只有关注到人的需求,将这些功能与人类福祉相联系,最终才能形成生态系统服务^[39]。因此,未来土壤保持服务研究有待于在以下几个方面进行加强和突破(图 4):

(1) 土壤再分配过程研究:目前土壤保持服务评估主要依赖于小尺度对土壤侵蚀机制研究取得的基本认识,而随着尺度增加,侵蚀机制发生改变,由于水平方向上泥沙运移导致的土壤再分配过程逐渐成为主导因素,因此未来需要加强对沉积过程的研究,更好地揭示流域区域尺度上土壤侵蚀过程的特点与规律,以服务大尺度评估的需求。

(2) 发展大尺度评估模型:全球变化背景下,大尺度土壤侵蚀对碳循环影响逐渐成为关注重点,而如何借助遥感、GIS 平台的发展以及利用植被指数、NPP、地形等多源数据发展大尺度土壤保持服务评估模型将会起

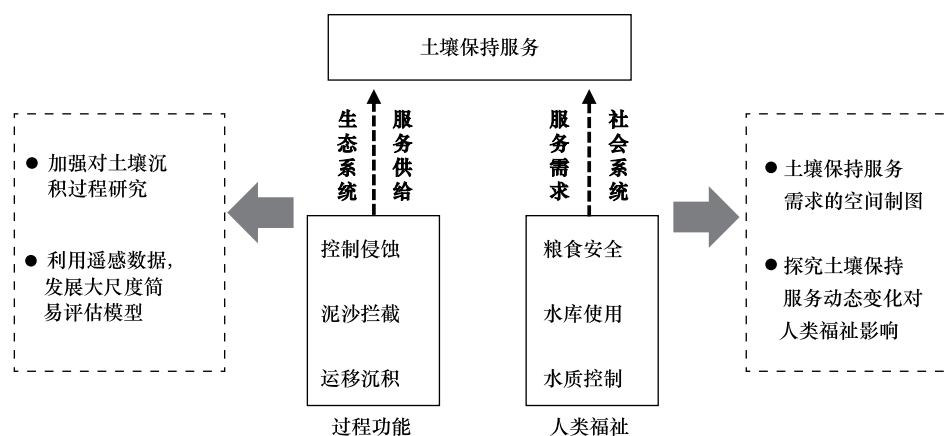


图4 水土保持服务研究重点方向

Fig.4 The key direction for soil conservation service assessment

到关键的支撑作用。

(3) 水土保持服务实际供给研究: 在明确水土保持服务潜在供给区域和供给量的基础上, 进一步确定受益区和受益人群的空间位置, 刻画服务供给随传输媒介流向人类的过程, 从而建立生态系统服务供给和人类福祉之间的动态互馈机制, 进而服务于生态系统的科学管理。

(4) 水土保持服务需求的空间制图: 有待于将水土保持服务研究与可持续发展目标相结合, 从人类需求角度出发, 分析不同可持续目标实现与水土保持服务供给间的关系, 明确实现可持续发展目标所需的土壤保持服务供给, 在此基础上, 完成水土保持服务需求空间制图, 以反映不同区域需求的差异。

参考文献 (References):

- [1] Reid W V, Mooney H A, Cropper A, Capistrano D, Carpenter S R, Chopra K, Dasgupta P, Dietz T, Duraiappah A K, Hassan R. Millennium Ecosystem Assessment Synthesis Report. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [2] Costanza R, D'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387: 253-260.
- [3] Wall D H, Six J. Give soils their due. *Science*, 2015, 347(6223): 695.
- [4] van Oost K, Verstraeten G, Doetterl S, Notebaert B, Wiaux F, Broothaerts N, Six J. Legacy of human-induced C erosion and burial on soil-atmosphere C exchange. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(47): 19492-19497.
- [5] Nations U, Brink P T. The Economics of Ecosystems and Biodiversity in National and International Policy Makers. London: Earthscan, 2011.
- [6] Bangash R F, Passuello A, Sanchez-Canales M, Terrado M, López A, Elorza F J, Ziv G, Acuña V, Schuhmacher M. Ecosystem services in Mediterranean river basin: Climate change impact on water provisioning and erosion control. *Science of the Total Environment*, 2013, 458-460: 246-255.
- [7] 赵景柱, 肖寒, 吴刚. 生态系统服务的物质量与价值量评价方法的比较分析. *应用生态学报*, 2000, 11(2): 290-292.
- [8] Brambilla M, Ilahiane L, Assandri G, Ronchi S, Bogliani G. Combining habitat requirements of endemic bird species and other ecosystem services may synergistically enhance conservation efforts. *Science of the Total Environment*, 2017, 586: 206-214.
- [9] Frank S, Fürst C, Witt A, Koschke L, Makeschin F. Making use of the ecosystem services concept in regional planning—trade-offs from reducing water erosion. *Landscape Ecology*, 2014, 29(8): 1377-1391.
- [10] Fu B J, Zhao W W, Chen L D, Zhang Q J, Lü Y H, Gulincik H, Poesen J. Assessment of soil erosion at large watershed scale using RUSLE and GIS: A case study in the Loess Plateau of China. *Land Degradation & Development*, 2005, 16(1): 73-85.
- [11] Fu B J, Liu Y, Lü Y H, He C S, Zeng Y, Wu B F. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China. *Ecological Complexity*, 2011, 8(4): 284-293.
- [12] Chiang L C, Lin Y P, Huang T, Schmeller D S, Verburg P H, Liu Y L, Ding T S. Simulation of ecosystem service responses to multiple disturbances from an earthquake and several typhoons. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 122: 41-55.
- [13] Bai Y, Ouyang Z Y, Zheng H, Li X M, Zhuang C W, Jiang B. Modeling Soil Conservation, Water Conservation and Their Tradeoffs: A Case Study in Beijing. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(3): 419-426.
- [14] Geneletti D. Assessing the impact of alternative land-use zoning policies on future ecosystem services. *Environmental Impact Assessment Review*,

- 2013, 40: 25-35.
- [15] Parsons A J, Wainwright J, Brazier R E, Powell D M. Is sediment delivery a fallacy? *Earth Surface Processes and Landforms*, 2006, 31(10): 1325-1328.
- [16] Hamel P, Chaplin-Kramer R, Sim S, Mueller C. A new approach to modeling the sediment retention service (InVEST 3.0): Case study of the Cape Fear catchment, North Carolina, USA. *Science of the Total Environment*, 2015, 524-525: 166-177.
- [17] Sánchez-Canales M, López-Benito A, Acuña V, Ziv G, Hamel P, Chaplin-Kramer R, Elorza F J. Sensitivity analysis of a sediment dynamics model applied in a Mediterranean river basin: Global change and management implications. *Science of the Total Environment*, 2015, 502: 602-610.
- [18] Wilkinson S N, Prosser I P, Rustomji P, Read A M. Modelling and testing spatially distributed sediment budgets to relate erosion processes to sediment yields. *Environmental Modelling & Software*, 2009, 24(4): 489-501.
- [19] de Vente J, Poesen J, Verstraeten G, Govers G, Vanmaercke M, van Rompaey A, Arabkhedri M, Boix-Fayos C. Predicting soil erosion and sediment yield at regional scales: Where do we stand? *Earth-Science Reviews*, 2013, 127: 16-29.
- [20] Syvitski J P M, Vörösmarty C J, Kettner A J, Green P. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science*, 2005, 308(5720): 376-380.
- [21] Syvitski J P M, Peckham S D, Hilberman R, Mulder T. Predicting the terrestrial flux of sediment to the global ocean: A planetary perspective. *Sedimentary Geology*, 2003, 162(1/2): 5-24.
- [22] 胡胜, 曹明明, 刘琪, 张天琪, 邱海军, 刘闻, 宋进喜. 不同视角下 InVEST 模型的土壤保持功能对比. *地理研究*, 2014, 33(12): 2393-2406.
- [23] Naipal V, Reick C, van Oost K, Hoffmann T, Pongratz J. Modeling long-term, large-scale sediment storage using a simple sediment budget approach. *Earth Surface Dynamics*, 2016, 4(2): 407-423.
- [24] Barral M P, Oscar M N. Land-use planning based on ecosystem service assessment: A case study in the Southeast Pampas of Argentina. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 154: 34-43.
- [25] Egoh B, Reyers B, Rouget M, Richardson D M, Le Maitre D C. Mapping ecosystem services for planning and management. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2008, 127(1/2): 135-140.
- [26] Jackson B, Pagella T, Sinclair F, Orellana B, Henshaw A, Reynolds B, McIntyre N, Wheeler H, Eycott A. Polyscape: A GIS mapping framework providing efficient and spatially explicit landscape-scale valuation of multiple ecosystem services. *Landscape and Urban Planning*, 2013, 112: 74-88.
- [27] Logsdon R A, Chaubey I. A quantitative approach to evaluating ecosystem services. *Ecological Modelling*, 2013, 257: 57-65.
- [28] Fu B J, Wang Y F, Lu Y H, He C S, Chen L D, Song C J. The effects of land-use combinations on soil erosion: A case study in the Loess Plateau of China. *Progress in Physical Geography*, 2009, 33(6): 793-804.
- [29] Chen D, Wei W, Chen L D. Effects of terracing practices on water erosion control in China: A meta-analysis. *Earth-Science Reviews*, 2017, 173: 109-121.
- [30] 傅伯杰, 陈利顶, 王军, 孟庆华, 赵文武. 土地利用结构与生态过程. *第四纪研究*, 2003, 23(3): 247-255.
- [31] 赵文武, 傅伯杰, 吕一河, 陈利顶. 多尺度土地利用与土壤侵蚀. *地理科学进展*, 2006, 25(1): 24-33.
- [32] Jiang C, Wang F, Zhang H Y, Dong X L. Quantifying changes in multiple ecosystem services during 2000-2012 on the Loess Plateau, China, as a result of climate variability and ecological restoration. *Ecological Engineering*, 2016, 97: 258-271.
- [33] Lorencová E, Frélichová J, Nelson E, Vačkář D. Past and future impacts of land use and climate change on agricultural ecosystem services in the Czech Republic. *Land Use Policy*, 2013, 33: 183-194.
- [34] Van Oost K, Quine T A, Govers G, de Gryze S, Six J, Harden J W, Ritchie J C, McCarty G W, Heckrath G, Kosmas C, Giraldez J V, da Silva J R M, Merckx R. The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle. *Science*, 2007, 318(5850): 626-629.
- [35] Ito A. Simulated impacts of climate and land-cover change on soil erosion and implication for the carbon cycle, 1901 to 2100. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(9): L09403.
- [36] Yang D W, Kanae S, Oki T, Koike T, Musiake K. Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes. *Hydrological Processes*, 2003, 17(14): 2913-2928.
- [37] Doetterl S, van Oost K, Six J. Towards constraining the magnitude of global agricultural sediment and soil organic carbon fluxes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2012, 37(6): 642-655.
- [38] Naipal V, Reick C, Pongratz J, van Oost K. Improving the global applicability of the RUSLE model-adjustment of the topographical and rainfall erosivity factors. *Geoscientific Model Development Discussions*, 2015, 8(9): 2893-2913.
- [39] 吕一河, 胡健, 孙飞翔, 张立伟. 水源涵养与水文调节: 和而不同的陆地生态系统水文服务. *生态学报*, 2015, 35(15): 5191-5196.